

Imagem, cortesia NASA/JPL/NIMA (http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=311)

Pormenor de um Interferograma de Radar adquirido durante a missão da NASA “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM), levada a cabo em Fevereiro de 2000 pelo Vaivém Espacial “Endeavour”, que levou a bordo duas antenas de radar (SAR), separadas de 60 m. A imagem representa a topografia de uma zona do estado de Nova Iorque, a Sul do lago Ontário, uma paisagem esculpida pela última glaciação. A cada ciclo de cor (franja) correspondem 100m de variação de altitude. Dimensões aproximadas: 50 por 40 quilómetros; Norte na direcção do canto superior direito.

A Terra em franjas

Ver a Terra fora dela

Sandra Heleno

HÁ MARCOS HISTÓRICOS EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE QUE SE FALA AINDA MUITO POUCO. UM DELES ACONTECEU NO ANO DE 1972, O ANO QUE MARCA O INÍCIO DA OBSERVAÇÃO DA TERRA A PARTIR DO ESPAÇO PARA FINS CIVIS.

Nesse ano a NASA colocou em órbita o Landsat 1, o primeiro satélite civil desenvolvido para investigar os recursos naturais do planeta. A bordo seguiam transdutores¹ da radiação electromagnética solar reflectida na superfície terrestre, para quatro bandas espectrais estreitas. As imagens digitais assim produzidas cobrem praticamente todo o globo, com

um tempo de revisita de pouco mais de 2 semanas, e uma resolução de 80m no solo. Do sucesso desta primeira missão resultou a explosão tecnológica que hoje conhecemos na observação da Terra por satélite. Um exemplo é a série Landsat, que conta já sete satélites², e testemunha o avanço dos sensores multi-espectrais, com resolução de imagem até 15 m, e bandas espectrais optimizadas para o estudo da cobertura vegetal e da geologia (exemplo na figura 1). Mas muitos outros programas e missões espaciais realizam actualmente a observação sistemática da superfície terrestre, com dezenas de sistemas de sensores passivos (e.g. multi-espectrais) e activos (e.g. radar) em órbita, operados por diversas agências espaciais governamentais. Imagens de satélite

de alta resolução (capazes de distinguir objectos com 60 cm) são hoje disponibilizadas comercialmente por empresas a operar no ramo espacial.

INTERFEROMETRIA DE RADAR RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)

A técnica a que se refere o acrónimo RADAR (“Radio detection and ranging”) baseia-se na emissão de radiação electromagnética com frequência na banda das microondas (comprimentos de onda de 1 cm a 1m), e na consequente detecção da energia reflectida por objectos na linha de vista do sensor. O tempo que o pulso leva no caminho de ida e volta determina a distância ao objecto reflector, enquanto a intensidade do eco dá uma medida da reflectividade do alvo, dependente de características como a rugosidade, ou teor de humidade. Os sistemas de Radar de Abertura Sintética (SAR³) permitem a geração de imagens de radar de alta resolução da superfície terrestre, num processo denominado focagem SAR (ver caixa A). Tal é conseguido com uma pequena antena (1-2m) a bordo de um satélite orbitando a 800 km de altitude, e varrendo obliquamente a superfície terrestre com um feixe de microondas. Uma imagem SAR pode numa primeira impressão assemelhar-se a uma fotografia aérea a preto e branco. Nada mais enganador: a geometria oblíqua do sistema de aquisição, e a incapacidade de distinguir objectos localizados à mesma distância da antena mas com ângulos diferentes em relação a esta, dão origem a importantes distorções geométricas da imagem, especialmente em zonas montanhosas. No que respeita à amplitude do eco, vertentes viradas na direcção da antena de satélite, edifícios urbanos, estruturas metálicas, e solo húmido, aparecem com intensidade alta na imagem. Em contraste, superfícies suaves, como rios e lagos, dão origem a sinais de intensidade baixa (porque a reflexão é especular). A figura 2 mostra um exemplo em que esta última característica é explorada, em imagens de radar adquiridas pouco antes e durante a cheia de Novembro de 1997 na região de Santarém. O mapeamento de cheias é uma aplicação em que as microondas apresentam uma mais-valia crítica: a de serem capazes de penetrar a cobertura de nuvens, frequente durante inundações.

INTERFEROMETRIA DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (INSAR)

Como qualquer sinal electromagnético monocromático, o eco do radar é caracterizado por uma amplitude e uma fase. Diferentes distâncias antena-reflector produzem diferenças nos tempos de percurso das microondas, que podem ser medidas através da diferença de fase dos ecos. Após a focagem SAR (caixa A), a imagem de radar consiste num registo bidimensional das amplitudes e fases dos ecos provenientes da superfície varrida pelo feixe de microon-



Fonte: NASA (<http://rst.gsfc.nasa.gov/>)

Figura 1: Desflorestação no Sudoeste da Amazônia (Rondonia, Noroeste do Brasil), revelada por uma imagem Landsat TM adquirida em 1986. As linhas a azul claro representam áreas desflorestadas no interior da floresta sobrevivente (a roxo).

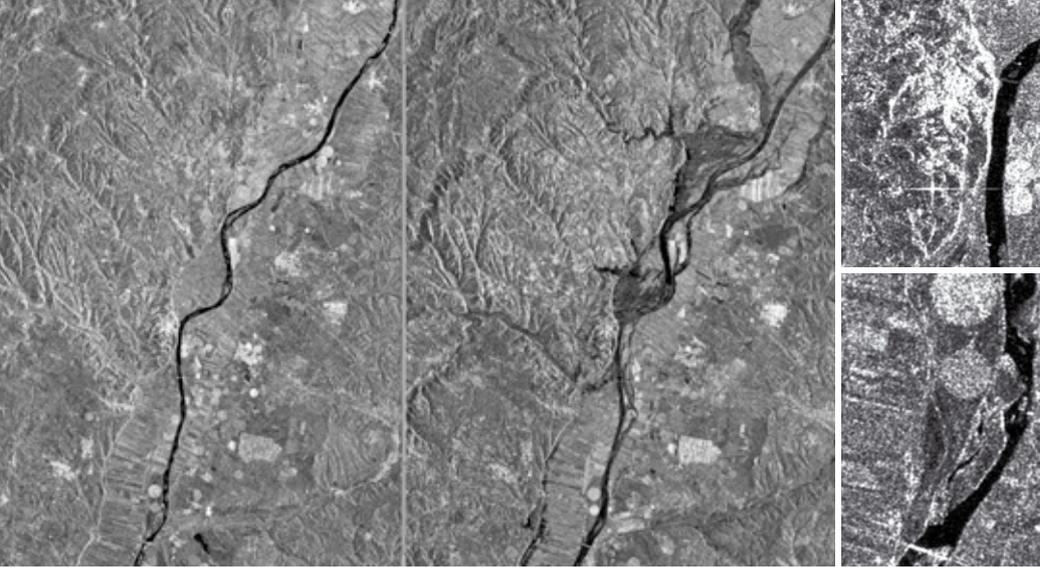
das. É possível usar a informação da fase contida em duas imagens SAR, adquiridas de posições orbitais ligeiramente diferentes, para produzir um padrão de interferência das microondas, ou interferograma (caixa B). Para tal as duas imagens SAR têm de ser alinhadas pixel a pixel (tendo estas dimensões típicas de 20m), e o padrão de interferência resultante é representado por uma grelha 2D em que cada célula de resolução contém a diferença de fase entre os dois pixéis originais. Num interferograma (exemplos na figura 3) a fase relativa é codificada em cores, e cada ciclo de cor, ou franja, varre um intervalo de 0 a 2π radianos, entre os máximos de interferência construtiva. A topografia da superfície terrestre pode ser obtida a partir da informação, pixel a pixel, da variação da distância ao satélite, para duas imagens adquiridas a partir de órbitas ligeiramente diferentes⁴. Em Fevereiro de 2000 a NASA colocou duas antenas SAR, separadas de 60 m, a bordo do Vaivém Espacial “Endeavour”. A Missão “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM) mapeou com uma cobertura quase global a topografia terrestre, com uma

¹ O sensor Multispectral Scanner (MSS), <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/mss.html>

² O sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM+) a bordo do Landsat 7 atinge a resolução de 30 metros nas bandas do visível e infravermelho, mas inclui uma banda pancromática (sensível a todo o espectro visível, resulta numa imagem realista a preto e branco) com resolução de 15 m.

³ Synthetic Aperture Radar.

⁴ A geometria orbital é conhecida com precisão.



Pormenor 1. Cidade de Santarém junto ao rio Tejo. As vertentes inclinadas na direcção do satélite, a zona urbanizada da cidade, e os círculos de irrigação agrícola, reflectem eficientemente o sinal radar de volta para a antena, ao contrário da superfície plana materializada pelas águas do rio.

Pormenor 2. A Sul de Santarém, num troço do Rio Tejo. Observa-se maior intensidade do eco radar em zonas de maior reflectividade, como a ponte que atravessa o rio, ou em círculos de irrigação agrícola. Os mouchões de areia no Tejo também oferecem contraste de intensidade em relação às águas do rio.

(Imagens fornecidas pela ESA, no âmbito do projecto cat-1 SUBSIn)

Figura 2: Imagens SAR de um troço com 45 km do Rio Tejo (de Valada, a Sul, passando por Santarém, até à Golegã), adquiridas pelo satélite ERS-2 da ESA, em 3 de Outubro de 2007 (à esquerda) e 7 de Novembro de 2007 (à direita). A área de baixa intensidade do eco de radar na imagem da direita corresponde à região inundada pelas cheias de Novembro de 1997 na região do Baixo Tejo. Ver análise destas imagens em Silveira e Heleno (2008).

resolução de 25 metros (ver figura de abertura).

APLICAÇÕES DO INSAR AOS RISCOS NATURAIS

O potencial mais fascinante do InSAR reside, sem dúvida, na sua capacidade de detectar e medir, a partir do espaço, pequenas deformações da superfície terrestre. De facto, se numa determinada zona, e entre duas passagens do satélite⁵, a crosta terrestre se mover de forma a aumentar ou a diminuir a sua distância à antena de radar, a diferença de fase resultante pode ser medida, e consequentemente também o deslocamento do solo na direcção da linha de vista do radar, com uma precisão da ordem dos milímetros. Há inúmeros exemplos de aplicações do InSAR na área dos riscos geológicos, como a monitorização vulcânica (figura 3), a subsidência de terrenos causada por exploração de águas subterrâneas, ou o estudo de deformações associadas ao ciclo sísmico (figura 4). O ciclo sísmico refere-se à repetição de sismos na mesma falha: um terramoto ocorre como consequência da acumulação, com velocidade da ordem dos milímetros ou centímetros por ano, de deformação elástica na crosta terrestre (Wright, 2002). A possibilidade, trazida pelo InSAR, de mapear com alta resolução espacial grandes extensões de deformação inter-sísmica⁶ encerra em si um potencial de enorme impacto na sociedade, pois abre as portas ao desenvolvimento da *previsão* sísmica. O termo *previsão* é neste contexto utilizado no sentido do termo inglês *forecast*, em que é atribuída uma probabilidade

de à rotura de um determinado segmento de falha para um período de tempo definido. Este tipo de *previsão de médio prazo* é de vital importância, pois permite às agências de protecção civil prepararem as comunidades na vizinhança da falha, através de programas de educação e intervenção (*retrofitting*) no edificado (Wright, 2002).

LIMITAÇÕES. PSINSAR

Falou-se até aqui da sensibilidade da fase do sinal de radar à topografia e à deformação da crosta. Um outro importante factor a ter em conta é o efeito da composição da atmosfera na velocidade das microondas, uma contribuição que pode ser relevante se duas imagens SAR forem adquiridas em condições atmosféricas diferentes. A variabilidade atmosférica da fase é controlada pela flutuação espacial e temporal do conteúdo de vapor de água na baixa troposfera, um efeito que pode ser dominante em regiões tropicais ou sub-tropicais, como é o caso do interferograma na figura 3c (Ilha do Fogo, Cabo Verde). Esta é uma das principais limitações da interferometria de radar, a par da *descorrelação*⁷ geométrica ou temporal das células de resolução no terreno (Hanssen, 2001). Para resolver estas limitações, Ferretti et al. (2001) desenvolveram nos finais dos anos 90, em Milão, o método *Permanent Scatterers Interferometry* (ou PSInSAR), em que os efeitos atmosféricos são estimados e removidos através da combinação de um elevado número de imagens SAR (típicamente 50 ou mais) da mesma zona, adquiridas ao longo de um determinado período de tempo. Para tal analisa-se, nos interferogramas calculados relativamente a uma única imagem (*master*), a fase dos reflectores naturais menos afectados por *descorrelação* (e por isto denominados *permanent scatterers*), explorando as suas relações espaço-temporais para isolar as diferentes contribuições para a fase: orbital, topográfica, defor-

⁵ Estas passagens ocorrem de 35 em 35 dias, no caso do ERS-1, ERS-2 e Envisat.

⁶ Ou pré-sísmica

⁷ Diminuição da coerência devido a movimentos incoerentes dos elementos reflectores dentro do pixel entre as duas aquisições de radar (*descorrelação temporal*) ou devido a ângulos de incidência do radar muito diferentes (*descorrelação geométrica*), dependendo da geometria orbital.

⁸ O algoritmo de optimização é também capaz de estimar as séries temporais do deslocamento na linha de vista do satélite, para cada PS, mas assumindo a priori um modelo simples de deformação (linear ou periódico).

⁹ Utilizando o já longo catálogo SAR da Agencia Espacial Europeia, de 1991 ao presente (satélites ERS1-2, Envisat), com um período de revisita de 35 dias.



(A partir de imagens fornecidas pela ESA, no âmbito do projecto cat-1 SAMAAV)

Figura 3a: Interferograma da Ilha do Fogo, Cabo Verde, calculado a partir de duas imagens SAR adquiridas em Fevereiro e Março de 2006 com o instrumento ASAR colocado a bordo do satélite Envisat, lançado pela ESA em 2002. Cada ciclo de cor (azul, púrpura, amarelo, verde, e novamente azul) representa uma diferença de fase de 2π radianos. As franjas de interferência observadas devem-se essencialmente à diferença de fase produzida pela curvatura da superfície terrestre.

Figura 3b: O mesmo interferograma da alínea anterior, depois de corrigido o padrão de interferência sintético gerado pelo elipsóide de referência que aproxima a curvatura terrestre. As franjas residuais observadas devem-se aos efeitos combinados da topografia, variações atmosféricas, e eventual deformação do solo entre as duas passagens sucessivas do Envisat.

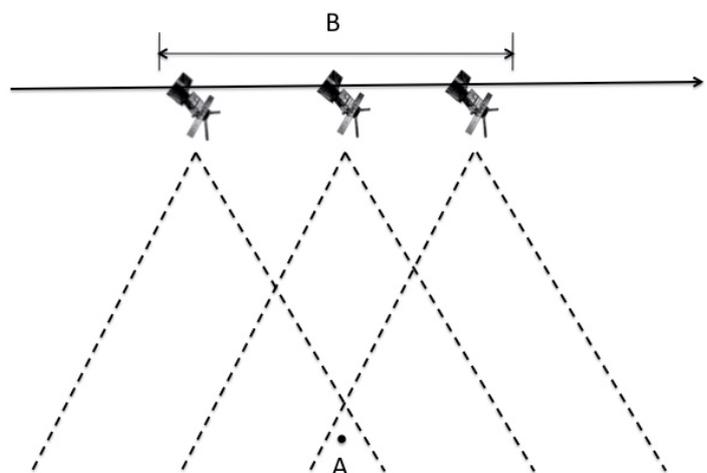
Figura 3c: O mesmo interferograma da alínea anterior, após correcção do efeito da topografia da Ilha do Fogo. Para tal usou-se o modelo digital de terreno global produzido pela missão "Shuttle Radar Topography Mission". As franjas observadas devem-se essencialmente à estratificação vertical do conteúdo em vapor de água na atmosfera, uma limitação do InSAR em regiões montanhosas com climas tropicais ou sub-tropicais, como é o caso da Ilha do Fogo, em Cabo Verde (Heleno et al., 2007; Heleno et al., em preparação). Os interferogramas das alíneas a, b, e c foram sobrepostos a uma imagem de amplitude do eco radar, e processados com o software open-source Doris InSAR processor (TUDelft). A escala de cor convencional varia entre interferogramas.

mação, atmosfera, ruído... O objectivo é a determinação da componente da fase devida à deformação do solo, e o cálculo da velocidade média na linha de vista do satélite de cada *permanent scatterer* (PS)⁸. Estes correspondem normalmente a estruturas construídas em meios urbanos, como edifícios, pontes, ou estruturas metálicas. Na figura 5 apresenta-se o mapa PSInSAR da região de Lisboa, em que foram utilizadas mais de 50 imagens SAR na determinação do deslocamento médio, ao longo da última década,⁹ de cerca de 200.000 pontos (PS) no terreno. Tem sido reclamada uma precisão submilimétrica para o PSInSAR, mas o método tem limitações importantes na análise de zonas afectadas por deformação complexa (Crosetto et al., 2007). Ainda objecto de estudos experimentais de validação, o PSInSAR promete revolucionar as áreas científicas da geodesia e geofísica.

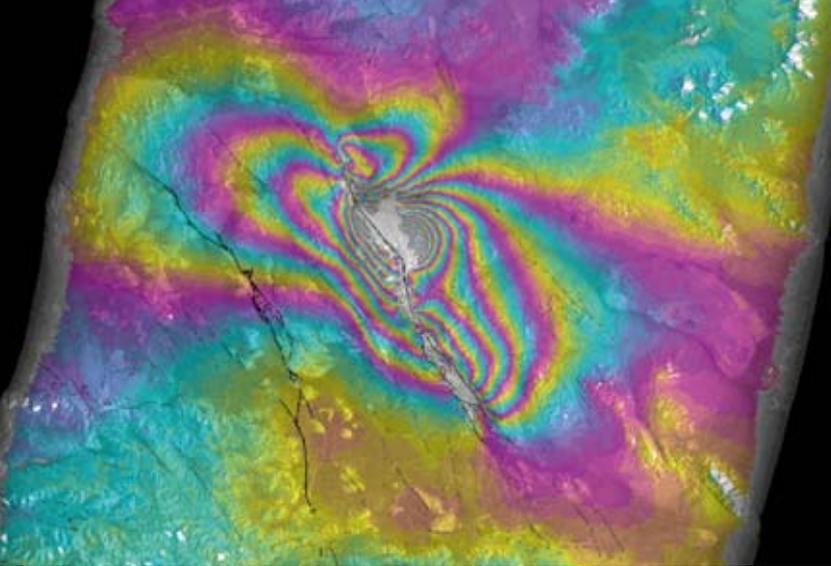
Caixa A – Do eco de radar às imagens SAR

A técnica convencional de geração de imagens de radar usa o sinal reflectido para deduzir informação acerca do alvo, e desta forma gerar uma imagem 2D aproximada da área varrida. Um sistema de radar convencional a orbitar no espaço produziria imagens com células de resolução na ordem dos 5-10km, o que seria muito pouco interessante para as aplicações de observação da Terra. Os sistemas de Radar de Abertura Sintética (SAR) combinam técnicas de processamento de sinal com informação precisa sobre a trajectória orbital para produzir imagens de radar com resolução muito superior (na ordem dos metros ou dezenas de metros). Este processamento denomina-se **focagem SAR**.

Consiste, por um lado, no uso de técnicas de compressão de impulso na emissão do sinal de radar, com o objectivo de melhorar a diferenciação dos ecos provenientes de alvos próximos entre si ao longo da direcção perpendicular à trajectória orbital (*range*). A focagem na direcção da trajectória de voo (azimute) consiste na sintetização de uma antena de radar com uma abertura muito superior à real, fazendo-se para tal uso da coerência da fonte de radar e do movimento relativo da antena sobre o alvo (ponto A na figura). O sinal de radar reflectido pelo ponto A está presente em sucessivos ecos registados pela antena ao longo da sua trajectória. O tempo de percurso do sinal é combinado com a informação dada pela variação Doppler da frequência do sinal, permitindo distinguir alvos próximos entre si ao longo da direcção de voo.



Fontes: Burgmann et al., 2000; A. Fonseca & J. Cordeiro, 2004.

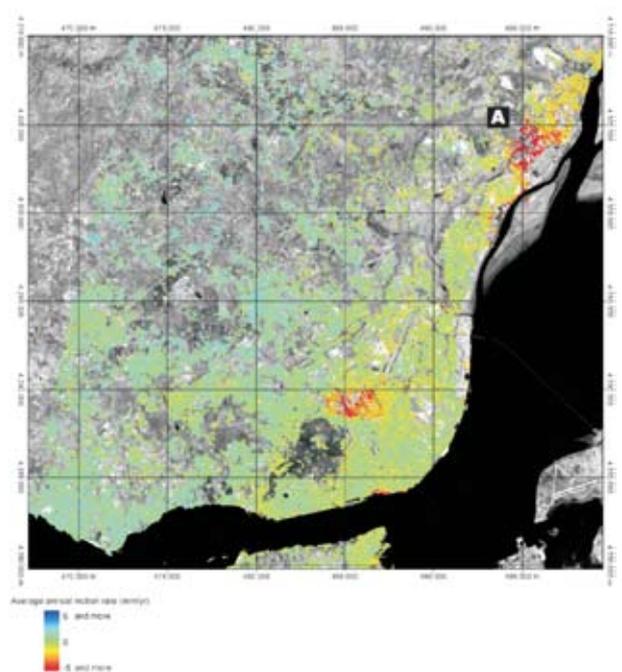


Imagem, Cortesia do Jet Propulsion Laboratory, NASA (<http://www-radar.jpl.nasa.gov/sect323/InSar4crust/HME/>)

Figura 4: Interferograma devido à deformação co-sísmica gerada pelo sismo “Hector Mine”, que ocorreu em 16 Outubro de 1999 na Califórnia, com Magnitude $M_w=7.1$, e produziu rotura superficial (representada pela linha no interior da zona com maior densidade de franjas) ao longo de 50 km. Um ciclo de cor representa uma variação de 10 cm da distância à antena de radar, entre as duas passagens do ERS-2 (em 15 de Setembro e 20 de Outubro de 1999). Para saber mais consultar Peltzer et al. (2001).

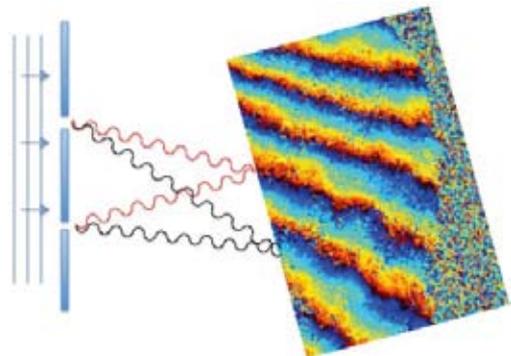
Caixa B – Interferência de ondas electromagnéticas

A interferência de ondas electromagnéticas ocorre quando duas ou mais ondas se sobrepõem num dado ponto. Se duas fontes de radiação são coerentes (i.e. mantêm constante a fase de uma em relação à outra) e emitem na mesma frequência, observa-se um padrão de interferência determinado pela variação espacial da diferença de fase (δ) entre as ondas sobrepostas. Para um alvo plano colocado a uma certa distância, nos pontos em que a radiação chega em fase ($\delta=0, 2\pi, 4\pi, \dots$ rad) dá-se interferência construtiva total e a amplitude é máxima. Nos pontos em que as duas ondas chegam em oposição de fase ($\delta=\pi, 3\pi, \dots$ rad), dá-se interferência destrutiva total e a amplitude é zero. À variação entre dois máximos de amplitude (franja de interferência) corresponde um ciclo de fase de 2π radianos.



Imagem, Cortesia NPA (Nigel Press Associates) group Dados fornecidos pela ESA (European Space Agency) Dados processados pela TRE (Tele-Rilevamento Europa) (http://www.terrafirma.eu.com/Documents/TERRAFIRMA_ATLAS.pdf)

Figura 5: Mapa PSInSAR da região de Lisboa (produzido no âmbito do Projecto ESA-GMES TerraFirma, liderado por Fugro NPA Ltd. www.terrafirma.eu.com). A letra A localiza a área industrial de Alverca do Ribatejo, onde se verifica a taxa máxima de subsidência do terreno na região de Lisboa. Para saber mais sobre o psinsar e os resultados TerraFirma em Lisboa: <http://sismologia.ist.utl.pt/psinsar/>



Referências

Burgmann, R., Rosen, P., Fielding, E., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 169-209.
Crosetto, M., Agudo, M., Raucules, D., Bourguine, B., de Michele, M., Le Cozannet, G., Bremmer, C., Veldkamp, J.G., Tragheim, D., Bateson, L., Engdahl, M., 2007. Validation of Persistent Scatterers Interferometry over a Mining Test Site: Results of the PSIC4 Project. Envisat Symposium, 23-27 April 2007, Montreux, Switzerland.
Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, n. 1, pp. 8-20.
Fonseca, A., Cordeiro, J., 2004. Detecção Remota. Lidel, Lisboa.

Hanssen, F., 2001. Radar Interferometry - Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers.
Heleno, S., dOreye, N., Oyen, A., Faria, B., Kervyn, F., 2007. Discrimination between tropospheric effects and crustal deformation in SAR interferograms of Fogo volcano, Cape Verde Islands (1993 - 2006). 26th ECGS Workshop "Active Volcanism & Continental Rifting", 19-21 November 2007, Luxembourg. (disponível em <http://www.ecgs.lu/pdf/AVCOR07/Presentations/AVCOR07-Heleno.pdf>)
Heleno, S., Frischknecht, C., dOreye, N., Lima, J., Kervyn, F., em preparação. Seasonal Tropospheric Influence on SAR Interferograms for Volcanoes close to the ITCZ - the case of Fogo and Mount Cameroon. Para submissão ao Journal of Volcanology and Geothermal Research.

Peltzer, G., Crampé, F., Rosen, P., 2001. The Mw 7.1, Hector Mine, California earthquake: surface rupture, surface displacement field, and fault slip solution from ERS SAR data. Earth and Planetary Sciences, 333, pp. 545-555.
Silveira, M., Heleno, S., 2008. Water/Land Segmentation in SAR Images Using Level Sets. IEEE International Conference on Image Processing, October 12-15, 2008, San Diego, Califórnia.
Wright, T., 2002. Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry. Philosophical Transactions of the Royal Society A, vol. 360, n. 1801, pp. 2873-2888.

Sandra Heleno licenciou-se e doutorou-se em Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico, em 1995 e 2001. Foi Bolseira da Fundação para a Ciência e a Tecnologia entre 1996 e 2007, nas áreas da sismologia e da vulcanologia, tendo desenvolvido o seu trabalho entre Lisboa, Cabo Verde e Reino Unido. É desde Janeiro de 2008 Investigadora Auxiliar no Instituto Superior Técnico (ICIST), na área de processamento digital de imagem de satélite, aplicada à mitigação dos riscos geológicos.

